

平成21年 4月 16日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560168

研究課題名 マイクロスケールの外乱に対する乱流輸送特性および散逸構造の応答

研究課題名 Response of transfer and dissipative structure of turbulence to the microscale disturbances

研究代表者

後藤 俊幸 (GOTOH TOSHIYUKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 70162154

研究成果の概要：

乱流における最小の渦よりも小さいマイクロバブルなどの微小な添加物や、計算格子以下のスケールの乱流運動による影響をマイクロスケールでの外乱とみなして、それらによる乱流への影響を大規模直接数値計算を駆使して調べた。渦周辺に置かれたマイクロバブルは渦中心に移動し、かつエネルギー散逸を増大させること、計算格子以下の運動は渦粘性と非正規分布に従うランダム力としてあらわされることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流、直接数値計算、マイクロスケール、散逸構造、乱流輸送

1. 研究開始当初の背景

乱流中では巨視的なサイズの乱流渦運動にエネルギーが注入され、流体運動の複雑な相互作用に伴う不安定性によって次第に小さなスケールの乱流運動にまでエネルギーが輸送され、最後にはミリメートル以下のサイズで粘性により熱に変わる。これまでの多くの実験および数値計算によって、乱流中には強い渦度がチューブ状に集中した構造（渦管、散逸構造）が多数存在することが知られている。世界最大規模の乱流の直接数値計算（DNS）に

よれば、乱流のレイノルズ数が極めて高いときには、これらの渦管が多数集まってクラスターの階層構造を形成し、それらが複雑に相互作用しながら生成、消滅を行っている。これらの渦管はその直径がコルモゴロフスケールの約10倍ほどであるが、長さはテイラーのマイクロスケールから乱流積分長 L までさまざまである。

コルモゴロフの乱流理論によると、レイノルズ数が十分高くかつエネルギーの注入されるスケールよりも十分小さいスケールでは、乱流の統計的法則が個々の乱流の特性にはよ

らずある普遍的な性質をもつようになる。このスケール領域は慣性領域と呼ばれ、巨視的スケール L と粘性スケール η 両方から独立であること、そして有限のエネルギー散逸が存在しそのエネルギー散逸の仕方の詳細にはよらないことが重要である。しかし、

(1) これまでの乱流研究から実際にはエネルギー散逸率が揺らぐことに起因する間欠性が存在して、必ずしも慣性領域は巨視的スケールとは独立ではありえないことがこれまでの研究によりわかってきている。これは筆者らの大規模DNSでも詳細に解析されている。

(2) 乱流に微量な線状高分子やマイクロバブルを添加すると乱流抵抗は低減する。このことは古くから知られているが、その物理的機構の解明はいまだ十分ではない。乱流中の最小渦スケールであるコルモゴロフスケールと同程度かそれより小さいスケールの添加物によって乱流の散逸構造が変化を受けそれがマクロな物理量である乱流抵抗の低減につながっている。

上の事実は、乱流の慣性領域の特性は巨視的スケールにも微視的スケールにも依存する可能性があることを示唆している。一方で、筆者らによる最近の大規模DNSでは、慣性領域での速度の低次モーメントは散逸スケールの詳細にはよらないという報告もなされており、この問題に対する物理的な説明は得られていない。乱流の大規模DNSにおいてはレイノルズ数をできるだけ高くするために散逸領域の深いところまで解像することなく計算を行っており ($K_{\max}\eta \sim 1$)、このことによる慣性領域への影響や散逸領域での解像できない乱流運動の影響を調べる必要があった。

2. 研究の目的

乱流のコルモゴロフ長さ程度のスケールをもつマイクロバブル、高分子などの微量な添加物、あるいは散逸領域に挿入された切断波数よりも高い波数成分 (SGS 成分) による影響をマイクロスケールでの外乱としてみなし、それによるスカラー輸送を伴う乱流の散逸構造、巨視的および慣性領域での輸送特性や統計法則の変化を、大規模 DNS を駆使して調べる。マイクロスケールの外乱に対する乱流の応答特性を解析し、乱流による抵抗増大、エネルギー輸送、添加物の拡散などの定量的予測、そして乱流の間欠性とその動力学

の解明を目的とする。さらに、切断波数の影響を乱流のくりこみ理論の観点から解析し、乱流モデルの物理的基礎についてのより多くの知見を得ることをも目指す。

3. 研究の方法

本研究では、慣性領域が存在する乱流および乱流によって輸送されるスカラー場 (スカラー乱流) の世界最大規模 DNS を実行し、乱流の散逸スケールに、ある時刻から攪乱あるいはマイクロバブルなどの添加物を加えて、乱流強度、乱流渦の変化、添加物の輸送形態、慣性領域でのスペクトル、エネルギー輸送が時間や波数と共にどのように変化するかを解析する。それにより、あまり変化しない部分からは乱流の普遍的な性質がどのようなものであるか、また敏感に変化する部分からは乱流のどの部分が制御しやすいのかについて調べることを目的とする。

また、エネルギー散逸の仕方によっては、慣性領域と散逸領域がクロスオーバーする波数領域に切断波数をもつ新しい乱流のラージエディシミュレーション (LES) モデルの可能性を探ることも可能である。これは切断波数 k_c が慣性領域内にある従来の LES とは異なる。もちろん、計算量の観点から言えば従来の LES に比べて有利ではないが、乱流の DNS においては、レイノルズ数が大きくなる時エネルギー散逸領域が広がる一方で慣性領域がさほど広くならない状況を考えると、これは従来型の LES と DNS の中間に行くものとしての可能性を秘めている。

さらに、乱流により輸送されるスカラー場の散逸構造や間欠性、そして輸送特性を DNS により解析して、乱流渦とは異なる幾何学構造を調べ、この微細構造とスカラー場の大きな空間構造およびヌッセルト数などとの関連性を解析する。これにより、乱流スカラー輸送における微細構造へのかく乱と巨視的な輸送量との関連を探ることを目指す。

研究が進むうちに、乱流やスカラー場の特異構造は空間次元とどのような関連性があるのかということが、クローズアップされてきた。すなわち、乱流では渦管、スカラー乱流ではフラクタル曲面などが特異構造とし

て知られているが、これらの衝突により散逸が促進される。空間次元を 3 から 4 に変化させることにより、衝突の機会が増えるのかもまた、乱流における輸送特性のより本質的な解明に向けて有用な情報を提供すると考えられたので、高次元乱流の DNS をも実行し、可視化により特異構造を解析することにした。

3. 研究成果

本研究において基礎となるのは、乱流とそれによって輸送されるスカラー場の詳細な数値データである。このための大規模 DNS をまず行った。速度場には外力を低波数側で加え、スカラー場には一様なスカラー勾配を印加して、統計的に定常なスカラー乱流場を世界最大規模の 2048^3 の空間格子点上で計算した[論文①, ④, ⑤]。速度場及びスカラー場は散逸領域の小さな構造まで詳細に解像されている。また、並列化に優れた格子ボルツマン法による乱流の DNS コードを作成し、その効率性や精度を調べた。その結果、1 点統計量には優れているものの、エネルギーや圧力のスペクトルの計算においては Navier-Stokes コードに軍配が上がるということがわかった[論文③, 発表③, ⑬]。

高レイノルズ数において、エネルギーとスカラーのスペクトルに慣性領域が確認され、かつスカラーフラックス $q=w\theta$ のスペクトルが $E_{u\theta} \sim k^{-7/3}$ となることを見出した(図 1)。スペクトルのべきについては、これまで理論および実験でもはっきりとした結論は出ていなかったが、初めて信頼性のある解析結果を与えた[論文①, ④, ⑤]。

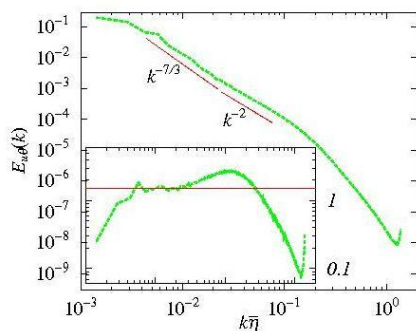


図 1 スカラーフラックスのスペクトル $R_\lambda=586$, $N=2048^3$. 小さな図は $k^{-7/3}E_{u\theta}(k)$.

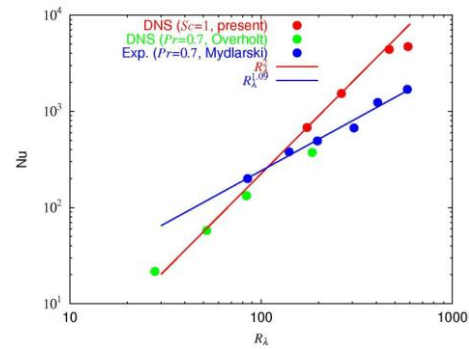


図 2 ヌッセルト数のレイノルズ数依存性 赤丸と緑丸が DNS、青丸は実験。

スカラーフラックスの微細構造だけでなく、巨視的統計量であるスカラー輸送係数をも解析した。DNS によりヌッセルト数 $Nu \propto \langle q \rangle$ がテイラーマイクロスケールレイノルズ数の 2 乗で増大することがわかった(図 2)。これは熱対流における Kraichnan 領域に相当するものであり、このような明瞭なスケールリングが見出されたのは、本研究での高レイノルズ数の DNS によるところが大きい。さらに、スカラー輸送の揺らぎの統計性を解析するため、1 点確率密度関数(PDF)を計算した。その結果、PDF は左右非対称であり、 $Q(q) \propto |q|^{-1/2} \exp(-c_\pm |q|)$ という指数型分布であることを理論的に示し、DNS データとも一致することがわかった[論文①, 発表⑥, ⑨]。

これらの研究は Cambridge 大学ニュートン研究所に 2008 年 8 月から約 1 ヶ月にわたる滞在中になされたものであり、10 月 2 日の同研究所での国際シンポジウムで招待講演として発表された[発表⑥, ⑧, ⑨]。さらに、この国際シンポジウムに先立って 9 月 24 日に Prospects of High Performance Computing in Turbulence Research が開催され、筆者はパネルディスカッションの議長を務めた。今後の大規模数値計算の可能性について大変示唆に富んだ議論がなされた。

レイノルズ数を一定にして解像度が異なる DNS をいくつか行い、高解像度のそれと比較して散逸領域内にある波数切断が大きなスケールの動力学や統計データにどのように影響するのかを解析した。その結果、動力学が正しく再現されていても、低解像度フィルター作用による統計データの変形効果はかなり大きく、動力学そのものに対する影響をやや上回る傾向にあることがわかった。こ

これは、乱流実験における計測について重要な知見を与える。

切断波数より高波数側からの影響をランジュバン方程式としてモデル化できるかを、乱流統計理論と上記の大規模データを用いて解析した。特に、乱流粘性とランダム力との関連性を統計的観点から解析し、乱流のスペクトル理論が予測するように、両者のスペクトルは切断波数近傍でカスプ的に大きくなること、低波数では乱流粘性はほぼ定数となり、ランダム力のスペクトルは k^{-4} に比例することを見出した。また、ランダム力は切断波数近傍では正規分布から大きくずれることが見出された。切断波数近傍での乱流粘性のカスプ的ふるまいなどは、従来の低レイノルズ数 DNS でも知られてはいたが、高レイノルズ数での検証は本研究が世界初である。これらの結果を NASA Langley 研究所、Los Alamos 国立研究所で講演し、多くの研究者の関心を引いた[発表⑩]。NASA の Rubinstein 博士とはその後も議論を継続し、以下に述べる数値的くりこみ群のアイデアへつながった。

これまで、切断波数より高い波数の SGS 成分は乱流粘性とランダム力という理解の仕方が一般的であったが、これは唯一の解釈ではない。統計的射影の方法を用いて、SGS 成分の線形項および非線形項への射影を行って、乱流粘性だけではなく、非線形項へのくりこみの可能性もあることを示した[発表①]。この研究はいまだ十分ではないが、数値的くりこみ群の手法であり、乱流理論上大きな興味を持たれる。

場の散逸構造形成につながる特異多様体(渦層、渦管など)の衝突の観点から、量子乱流と通常乱流との比較を行い、スペクトルの振る舞いや減衰法則との関連 DNS を用いて解析した[論文②]。2次元乱流では、エネルギーは保存され、3次元以上では散逸する。これは2次元での特異多様体が点(0次元)であるため衝突することがなく、3次元では特異多様体は線状(次元は1)であるので衝突することが可能であると解釈できる。このように、 d 次元空間に埋め込まれた次元 d_s を持つ2つの特異多様体が衝突するための必要条件を導いた。その結果、3, 4, 5次元と増大すると衝突の確率は増加し、DNS により直接確かめられた。このことは、高波数へ

のエネルギー輸送が空間次元とともに増大することとつじつまが合っている。また、量子乱流(超流動状態にある液体ヘリウムの乱流)においては、特異多様体が3次元では線状リングであり、古典乱流との類似性が知られているので、これについても同様な解析を行った。結果は4次元での特異多様体の可視化により、リングを4次元方向に掃引して得られる特異構造をしていることがわかった。これらの結果は、2008年バルチモアでの国際シンポジウムにて発表し、大きな関心を引いた。古典乱流では、空間次元をさらに5にあげたとき、エネルギー散逸はいつそう強められ、理論と一致していることがわかった[発表⑩, ⑫, ⑬]。

乱流中に加えられたマイクロバブルによる影響を解析するために、その基礎である乱流渦と複数のマイクロバブルとの相互作用を解析した。バブルのように2相で極端に密度が異なる場合のDNSは難しい。この問題を格子ボルツマン法によって解析した。テイラーグリーン渦やランキン渦を乱流中の最小渦とみなして、その近傍に多数のマイクロバブルを配置して、その後の運動や渦の変化を計算した。図3 a, b はそれぞれ初期および後の時刻でのマイクロバブルの空間配置である。渦周辺にあるバブルは、周期境界条件のため領域外のバブルと相互作用し引き伸ばされ、その後渦中心に集まる。さらに時間がたつと、中心軸上のバブルが合体を始める。この過程のうち、バブルが中心軸に向かって

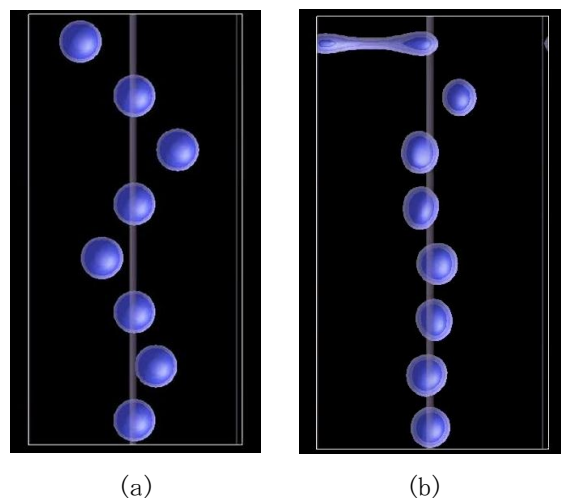


図3 (a) 8個のマイクロバブルの初期配置(密度比50). (b) 後の時刻におけるマイクロバブルの分布.

移動する際に、エネルギー散逸はバブルがない時よりも大きくなり、表面張力が大きいほどこの傾向が顕著になることがわかった[発表③, ④, ⑤]。

乱流中におかれた鎖状高分子が、乱流によりどのように変形されるかを、分子動力学の手法と乱流の DNS を用いて解析した。高分子は FENE-P モデルに従うビーズの 1 次元集合体として表現される。定常乱流中を浮遊する流体粒子をラグランジュ的に追跡することにより、その粒子の位置での速度勾配テンソルのラグランジュ的時系列データをまず取得し、その速度勾配中での鎖状高分子の時間発展を計算した。一例は図 4 a, b に示すようなもので、ワイセンベルグ数 W が 4 と 50 の場合における高分子とその近傍の流線である。コイル状と線状への遷移は $W=4\sim 7$ の領域で起こることが、可視化、高分子の末端間ベクトルの時間相関などから見出された。また、興味深いのは、末端間ベクトルのスケールで粗視化された乱流ストレイン場の固有値の確率密度関数が、乱流場の縦微分の確率密度関数とほぼ同一であることである(図 5)。理由はよくわかっていないが、乱流中の鎖状高分子モデルについて有用な知見を与えるものと考えられる[発表②, ⑦]。

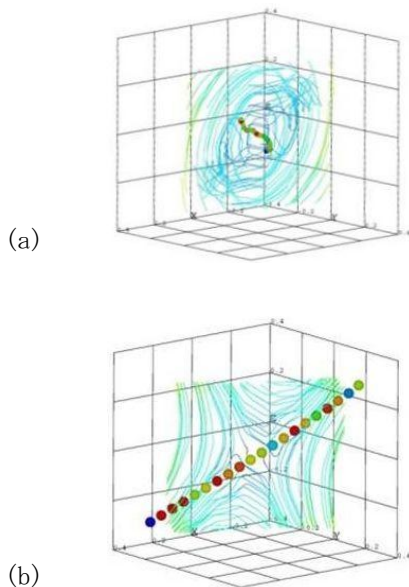


図 4 乱流中の鎖状高分子のふるまいと周辺の流線 (a) $W=4$, (b) $W=50$. ワイセンベルグ数は高分子の特性時間と乱流のコルモゴロフ時間の比。

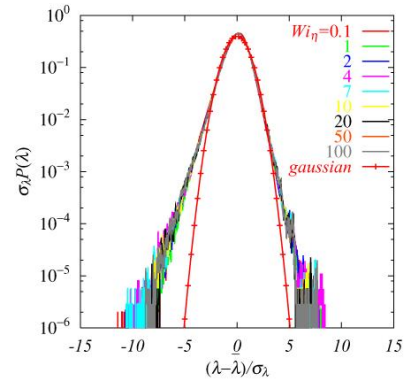


図 5 鎖状高分子の粗視化伸張率と縦速度微分の確率密度関数 $R_\lambda=47$, $N=128^3$. 赤い実線は正規分布を示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① T. Gotoh and T. Watanabe, "Scalar flux intermittency under the mean scalar gradient", 九州大学応用力学研究所 研究集会報告「乱流現象及び多自由度系の動力学構造と統計法則」, 20ME-S6, 92-102 2009, 審査無

② T. Gotoh, T. Nakano, Y. Shiga, and E. Suzuki, Energy dissipation and pressure in 4d turbulence, Proceedings of the IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence, 27-34, 2008, 審査有

③ 米本 隆 後藤俊幸 渡邊 威. 「格子ボルツマン法による一様等方乱流の数値計算」, 九州大学応用力学研究所 研究集会報告「乱流現象及び多自由度系の動力学構造と統計法則」, 19ME-S7, 29-36, 2008, 審査無

④ T. Watanabe and T. Gotoh, "Scalar flux spectrum in passive scalar convected by homogeneous turbulence under a uniform mean scalar gradient", Phys. Fluids, 19, 121701, (1-4), 2007, 審査有

⑤ T. Gotoh, Computational Physics of Turbulence, Proceedings of APCOM, Kyoto, MS9-1-1~12, 2007, 審査無

[学会発表] (計 16 件)

① 後藤俊幸, 渡邊威, Rubinstein 「乱流の DNS における切断波数の影響とレンジ

- ユバンモデリング」日本物理学会，3月27日，立教大学，2009
- ② 渡邊威，後藤俊幸「一様乱流中の高分子鎖の振る舞いとその統計性」日本物理学会，3月27日，立教大学，2009
- ③ 米本隆，渡邊威，後藤俊幸「格子ボルツマン法による一様等方性減衰乱流の直接数値計算」日本物理学会，9月20日，岩手大学，2008
- ④ 野々垣昭則，井上洋平，後藤俊幸「せん断流れ場中の2相系の時間発展」日本物理学会，9月20日，岩手大学，2008
- ⑤ 校條祐輔，井上洋平，後藤俊幸「多重格子を用いた Kelvin-Helmholtz 不安定性の直接数値計算」第6回日本流体力学会中部支部講演会，11月8日，名古屋工業大学，2008
- ⑥ 後藤俊幸，渡邊威「平均一様スカラー勾配のもとでの乱流スカラー場の統計」研究集会：「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」九州大学応用力学研究所，11月14日 2008
- ⑦ 渡邊威，後藤俊幸「乱流中の単一高分子鎖の挙動の数値シミュレーション」日本物理学会，9月20日，岩手大学，2008
- ⑧ T. Watanabe and T. Gotoh "Mixed velocity-scalar statistics in passive scalar turbulence with uniform a mean gradient", IUTAM meeting on "Rotating Stratified Turbulence and Turbulence in the Atmosphere and Oceans", Isaac Newton Institute, Cambridge, Dec. 8-12, 2008.
- ⑨ T. Gotoh Intermittency and scaling of passive scalar convected by isotropic steady turbulence under the uniform mean scalar gradient, Workshp on Inertial range dynamics and mixing, Isaac Newton Institute, Cambridge, Sept. 29-Oct. 3, 2008.
- ⑩ 中野徹，宮崎巧也，後藤俊幸「オイラー方程式の数値解の次元依存性」，京大数理解析研究所研究集会「オイラー方程式の数理，渦運動150年」7月18日 2008
- ⑪ T. Gotoh "Intermittency, accuracy, and modeling of homogeneous and passive scalar turbulence", NASA Langley Research Center, June 2, 2008、CNLS, Los Alamos National Lab. June, 4, 2008.
- ⑫ Y. Shiga, T. Miyazaki, W. Kubo, T. Nakano and T. Gotoh, "Energy dissipation and collisions of singular structures in classical and quantum turbulence", Symposium on Fluid Science and Turbulence, Johns Hopkins Univ., May 30, 31, 2008

- ⑬ 久保渉，中野徹，後藤俊幸「古典乱流と量子乱流」日本物理学会，3月24日，近畿大学，2008
- ⑭ T. Gotoh "Computational Physics of Turbulence" APCOM' December 3-6, Kyoto, 2007.
- ⑮ 米本 隆，後藤 俊幸，渡邊 威「格子ボルツマン法による一様等方乱流の数値計算」九州大学 応用力学研究所 研究集会乱流現象及び多自由度系の動力学，構造と統計法則 11月23日 2007.
- ⑯ 渡邊威 後藤俊幸「パッシブスカラー乱流におけるスカラーフラックススペクトルの振る舞い」，日本流体力学会 東大駒場，8月8日，2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤俊幸 (GOTOH TOSHIYUKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号:70162154

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

Dr. Robert Rubinstein
NASA Langley Research Center